

II КОНСТРУКЦІЙНІ І ФУНКЦІОНАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ

УДК 678.675

Канд. техн. наук А. И. Буря¹, канд. техн. наук Е. Ф. Кудина², Н. С. Гаюн¹

¹Государственный аграрный университет, г. Днепропетровск;

²Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого НАН Беларуси, г. Гомель

ВЛИЯНИЕ ПРИРОДЫ И СОДЕРЖАНИЯ НАПОЛНИТЕЛЕЙ НА СВОЙСТВА КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ФЕНИЛОНА

Исследованы физико-механические и триботехнические свойства материалов, полученных на основе термопласта фенилон С-2, модифицированного терморасширенным графитом и синтезированным эпоксисиликатом кобальта. Установлены оптимальные состав композита и режимы эксплуатации. Показано, что совместное использование наполнителей приводит к их взаимному активированию и синергическому эффекту, позволяющему широко варьировать эксплуатационные свойства материала.

Ключевые слова: наполнитель, трение, износ, прочность.

Интенсивное развитие различных областей техники требует разработки новых композиционных материалов на основе полимеров, обладающих высокими значениями эксплуатационных свойств в широком интервале температур. Для практического применения пластмасс часто требуется, чтобы изделие обладало, с одной стороны, способностью значительно деформироваться и не разрушаться при больших нагрузках, а с другой – при умеренных нагрузках противодействовать внешним силам, сохранять размеры и форму [1]. Эти требования, как правило, могут быть удовлетворены только частично. Многие ненаполненные термопласты обладают хорошей стойкостью к ударным нагрузкам и выдерживают значительные деформации без разрушения вследствие высокой пластичности, однако имеют низкий модуль упругости. Армированные пластмассы, например стеклопластики, чаще всего отличаются большой жесткостью, но разрушаются уже при незначительном (~ 1 %) относительном удлинении. Превосходит большинство промышленных пластмасс по комплексу физико-механических показателей фенилон (ФС), получаемый на основе ароматических полиамидов. Преимущество фенилона заключается в том, что материалы на его основе сочетают высокую тепло- и термостойкость с морозостойкостью, жесткость и прочность с хорошими антифрикционными свойствами, пластичностью и стойкостью к ударным нагрузкам, высокую усталостную прочность со стабильными диэлектрическими характеристиками, что обеспечивает возможность их широкого применения в различных отраслях народного хозяйства [2, 3]. Однако высокая вязкость расплава при температурах переработки значительно усложняет процесс получения изделий на основе ФС. Высокие значения коэффициента трения в сухом режиме ограничивают его эксп-

луатационные возможности. Введение в состав ФС в качестве наполнителей твердых смазок (например графита, дисульфида молибдена, фторопласта-4 и др.) приводит к значительному улучшению антифрикционных свойств фенилона, но одновременно способствует снижению прочностных показателей. Существующие недостатки выдвигают задачи для разработки эффективных методов модификации фенилона с целью направленного регулирования его свойств.

В данной работе проведено исследование влияния на свойства ФС совместного действия двух модификаторов: терморасширенного графита (ТРГ) и синтезированного органосиликатного нанокompозита. Выбор ТРГ обусловлен тем, что его введение в ФС обеспечивает существенное улучшение износостойкости и антифрикционных свойств получаемого композита [4]. Данные [5] свидетельствуют, что эпоксисиликаты переходных металлов могут являться эффективными модификаторами для термопластов. Интерес к высокодисперсным органосиликатным продуктам обусловлен их структурными особенностями, которые обеспечивают высокую активность дисперсных частиц и улучшение адгезионного взаимодействия на границе раздела полимерное связующее – наполнитель. Реализация различных физико-химических взаимодействий между связующим и наполнителем в процессе формирования композиционного материала, улучшающих процесс совмещения компонентов, несомненно, будет оказывать значительное влияние на свойства получаемых композитов.

В качестве связующего использовали полиамид фенилон С-2 – линейный гетероциклический сополимер, содержащий в основной цепи амидную группу – НNCO-, соединенную с двух сторон фенильными фрагментами. Получен эмульсионной поликонденсацией

дихлорангидрида терефталевой кислоты со смесью *n*- и *μ*-фенилендиаминов, взятых в эквимолярных количествах.

Терморасширенный графит получен из естественного графита при окислении персульфатом аммония в сернокислой среде с последующей термообработкой при температурах до 1200 К [6]. Структура ТРГ образуется в результате разделения исходного кристалла графита по кристаллографической оси С на тонкие ленты из небольшого числа сильно деформированных плоскостей с образованием складчатой структуры, которая обеспечивает ему уникальные свойства. В данной работе использовался ТРГ, который представляет собой вспученные цепочки черного цвета размером 0,2–10,0 мм, насыпной вес ~ 0,005 г/см.

В качестве органосиликатного наполнителя использовали эпокси силикат кобальта (ЭС_{Со}), полученный [5, 7] при интеркаляции атомов Со в эпокси силикатную матрицу (ЭС), которая сформирована при модифицировании щелочесиликатного раствора эпокси диановой смолой ЭД-20 [8] в соотношении компонентов 3SiO₂·Na₂O / ЭС=44/12 (масс. %). Структура синтезированных продуктов представляет структуру гибридно-смешанного типа [5, 9], где в эпокси силикатных нанокластерах (ЭС–Na₂Si₃O₇, ЭС–Na₆Si₃O₁₉) распределены нанодисперсные аморфные и кристаллические частицы (β-Na₂Si₂O₅, SiO₂ размером от 5 до 50 нм и CoSiO₃, CoSi₂O₅ размером 15–25 нм).

Свойства используемых исходных наполнителей представлены в таблице 1.

Гомогенизацию композиций, состоящих из фенилона С-2 и смеси наполнителей ТРГ и ЭС_{Со} (до 30 масс. %), осуществляли по методике, разработанной в лаборатории полимерных композитов ДГАУ (Днепропетровск) [10]. Образцы для исследования получали методом компрессионного прессования при температуре 588±1К и давлении 40 МПа.

Термический анализ образцов осуществляли на дериватографе Q-1500Д системы Паулик-Паулик-Эрдей. Испытания проводили в керамических тиглях на воздухе в интервале температур 298–973К и скорости нагрева – 5,0 °С/мин.

Удельную теплоемкость и коэффициент теплопроводности определяли на приборах ИТ–С-400 и ИТ–λ-400. Температуропроводность рассчитывали по формуле, используя данные коэффициента теплопроводности и удельной теплоемкости.

Прочностные характеристики (разрушающее напряжение при деформации 0,2 % и модуль упругости при сжатии) композиционных материалов (КМ) на основе термопластов определяли на разрывной машине FP-100. Триботехнические характеристики композиционных материалов определяли на машине трения СМЦ-2 при скорости скольжения *v* = 1 м/с и нагрузке 1 МПа.

ТРГ обеспечивает, по сравнению с традиционными графитами [1], повышение теплофизических, физико-механических и триботехнических свойств графитопластов, полученных на основе фенилона (рис. 1). Анализ экспериментальных данных показывает, что в исследуемом диапазоне концентраций ТРГ при увеличении

Таблица 1 – Свойства наполнителей

№ п/п	Наполнитель	Плотность		Пористость П, %
		насыпная, г/см ³	истинная, г/см ³	
1	ЭС _{Со}	0,476	1,998	76,7
2	ТРГ	0,0064	0,573	–

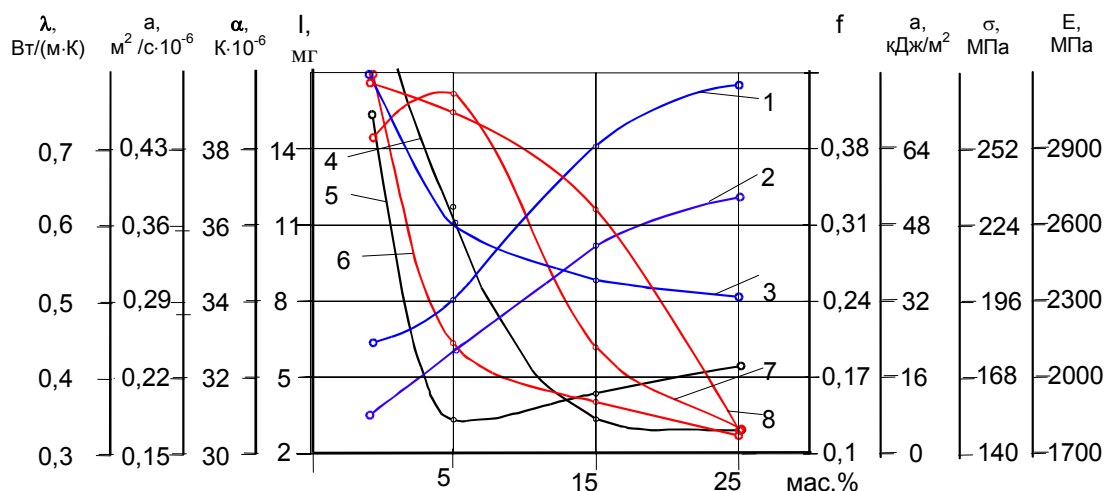


Рис. 1. Зависимость теплопроводности (1), температуропроводности (2), ТКЛР (3), износа (4), коэффициента трения (5), ударной вязкости (6), предел текучести (7) и модуля упругости (8) при сжатии графитопластов от содержания термически расщепленного графита

содержания наполнителя теплофизические (кривые: теплопроводность – 1, температуропроводность – 2, ТКЛР-3) свойства графитопласта улучшаются, а физико-механические (кривые 6, 7, 8), наоборот, как и следовало ожидать, ухудшаются. Наименьший коэффициент трения для данных условий ($PV = 3 \text{ МПа}\cdot\text{м/с}$) по результатам триботехнических характеристик (кривые 4, 5) наблюдается в материале при содержании наполнителя 5 масс. %, но при этом его износ в 5 раз больше, чем у графитопласта, который содержит 15 масс. % ТРГ. Следует указать, что данное значение критерия PV для графитопласта с 5 масс. % ТРГ является предельным, в то время как материалы с наполнителем в количестве 15 и 25 масс. % работают при $PV < 25 \text{ МПа}\cdot\text{м/с}$.

В таблице 2 приведены результаты термического анализа исходных компонентов и двухкомпонентных материалов: ФС, модифицированного ТРГ, в сравнении с материалом ФС – ЭС_{Co}. Анализ данных показывает, что модифицирование фенилона исходными наполнителями приводит к повышению термостойкости.

Для исследованных составов с ростом температуры в целом наблюдается также линейное повышение теплоемкости (табл. 3), обусловленное повышением гибкости цепных макромолекул связующего.

Введение наполнителя в ФС приводит к снижению теплоемкости, что можно объяснить взаимодействием макромолекул связующего с поверхностью наполнителя. Причем сначала наибольшее уменьшение значений теплоемкости наблюдается для составов с ТРГ, а с повышением температуры ($> 373\text{K}$) – для составов с ЭС_{Co}, что, возможно связано с активизацией активных центров эпоксисиликата кобальта и повышением степени взаимодействия компонентов на границе раздела фаз. Значения коэффициента теплопроводности бинарных композиционных материалов по сравнению с исходным связующим повышаются. Наиболее значительные изменения (на 10–58 %) отмечаются при введении ТРГ.

В таблице 4 приведены значения термостойкости ФС, полученного при введении двух наполнителей в зависимости от их соотношения. Анализ данных показывает, что увеличение содержания ТРГ во всех композициях приводит к возрастанию T_0 , T_5 , T_{10} и T_{20} и наиболее эффективное воздействие отмечается при применении наполнителя в количестве 15 масс. %. Содержание ЭС_{Co} меньше влияет на изменение термостойкости материала и наиболее оптимальным содержанием наполнителя является концентрация $\leq 8\%$ [11].

Таблица 2 – Результаты термического анализа исходных компонентов и композитов

Состав материала	Температура*, К				
	T_0	T_5	T_{10}	T_{15}	T_{20}
Фенилон	318	443	653	713	743
ЭС _{Co}	348	515	638	780	908-910
ТРГ	383	943	1013	1053	1083
Фенилон + 15 % ЭС _{Co}	323	443	703	733	753
Фенилон + 15 % ТРГ	325	523	691	733	753

Таблица 3 – Теплофизические характеристики исходного фенилона и композитов

Температура, К	Состав образца								
	Фенилон			Фенилон – 15 масс.% ТРГ			Фенилон – 15 масс.% ЭС _{Co}		
	C_p , кДж/кг·К	λ , Вт/м·К	$\alpha \cdot 10^{-6}$, м ² /с	C_p , кДж/кг·К	λ , Вт/м·К	$\alpha \cdot 10^{-6}$, м ² /с	C_p , кДж/кг·К	λ , Вт/м·К	$\alpha \cdot 10^{-6}$, м ² /с
323	1860	0,31	0,19	1100	0,45	0,35	1116	0,31	0,20
348	1950	0,31	0,19	1160	0,49	0,36	1226	0,31	0,19
373	1960	0,32	0,19	1300	0,49	0,32	1362	0,34	0,18
390	1920	0,34	0,19	1480	0,52	0,30	1344	0,36	0,19
423	1930	0,39	0,20	1680	0,57	0,29	1359	0,39	0,21
448	1910	0,37	0,19	1700	0,56	0,28	1554	0,40	0,19
473	1910	0,40	0,20	1770	0,56	0,27	1741	0,41	0,17
498	1950	0,42	0,18	1790	0,52	0,25	1695	0,42	0,18
523	2300	0,41	0,16	1900	0,45	0,20	1658	0,42	0,19
548	2440	0,43	0,17	2240	0,52	0,20	1840	0,45	0,18
573	2060	0,73	0,32	1760	0,59	0,29	1949	0,46	0,17

Таблица 4 – Термические свойства композитов на основе фенилона

Содержание наполнителей (масс. %)		Температура начала (5 %, 10 % и 20 %) потери массы (К)			
ТРГ	ЭС _{С₀}	T ₀	T ₅	T ₁₀	T ₂₀
15	15	323	393	653	693
15	8	343	618	678	723
15	1	348	488	658	733
8	15	321	373	543	683
8	8	338	518	663	703

По эффективности влияния модификаторов на уменьшение скачка теплоемкости использованные наполнители располагаются в следующий ряд (цифрами указано массовое соотношение компонентов) [11]:

ТРГ1ЭС_{С₀}15 > ТРГ1ЭС_{С₀}8 > ТРГ8ЭС_{С₀}1 > ТРГ8ЭС_{С₀}15 >
 > ТРГ15ЭС_{С₀}15 > ТРГ8ЭС_{С₀}8 > ТРГ15ЭС_{С₀}8 >
 > ТРГ15ЭС_{С₀}1 > ФС > ТРГ1ЭС_{С₀}1.

По мере роста суммарного содержания наполнителей скачок теплоемкости уменьшается к минимуму (321 Дж/кг·К), оставаясь меньшим, чем скачок исходного полимера (876 Дж/кг·К). Такой характер изменения скачка можно объяснить конкурирующим действием на его величину двух факторов. С одной стороны, величина скачка теплоемкости закономерно снижается с ростом количества введенного в композицию наполнителя, за счет исключения некоторой части макромолекул связующего из участия в кооперативном процессе стеклования вследствие взаимодействия их с поверхностью наполнителей. С другой стороны, увеличение концентрации наполнителя приводит к разрыхлению композиции, в результате чего уменьшается число контактов между цепями макромолекул, что приводит к росту их подвижности. Следует отметить,

что наибольшая эффективность гибридного наполнителя проявляется при соотношении компонентов ТРГ/ЭС_{С₀}=1/15 или 1/8, что, возможно, связано с активизирующим действием ТРГ на ЭС_{С₀}, способствующего физико-химическому взаимодействию макромолекул связующего с наполнителем. В целом применение комплексного наполнителя приводит к снижению значений теплоемкости материала и ее изменению с ростом температуры в диапазоне 1240–1360 Дж/кг·К, что значительно ниже, чем при использовании только ТРГ или ЭС_{С₀}.

В таблице 5 представлены результаты изучения теплового расширения полученных материалов.

Полученные данные показывают [11], что максимальное значение температуры стеклования (T_с) наблюдается у композитов состава 8Г15С и 15Г15С.

Анализ физико-механических свойств полученных композитов (рис. 2) позволил установить, что увеличение концентрации ТРГ в составе гибридного наполнителя приводит к уменьшению значений предела прочности и модуля упругости при сжатии, тогда как при увеличении концентрации эпоксисиликата кобальта предел прочности при сжатии уменьшается, а модуль упругости растет [11].

Анализ влияния режимов эксплуатации (давление и скорость скольжения) на триботехнические характеристики материала (рис. 3) с оптимальным содержанием

Таблица 5 – Коэффициент термического линейного расширения и температуры стеклования гибридных композитов

Температура, К	$\alpha \cdot 10^6, K^{-1}$ при содержании наполнителя (ТРГ / ЭС _{С₀}), масс.%								
	15/15	15/8	15/1	8/15	8/8	8/1	1/15	1/8	1/1
298–323	1,85	2,35	2,33	2,67	2,17	2,58	2,63	2,20	2,66
298–348	3,56	4,48	4,63	4,71	4,10	4,93	4,40	4,45	4,88
298–373	4,80	6,60	6,71	6,75	6,14	6,88	6,02	6,73	6,89
298–398	6,47	8,37	8,39	8,62	7,81	8,91	7,54	8,79	9,16
298–423	8,02	10,21	10,15	10,41	9,70	10,64	9,37	10,65	11,15
298–448	9,11	11,78	11,92	11,92	11,28	12,47	11,11	12,51	13,03
298–473	9,57	13,44	13,52	13,77	12,93	14,16	12,62	14,38	14,93
298–498	12,28	15,08	15,59	15,53	14,58	16,45	14,43	15,96	16,79
298–523	13,99	17,19	17,99	17,19	16,69	18,48	15,75	18,21	18,66
298–548	14,24	15,91	17,72	18,53	17,20	18,34	–	–	–
T _с , К	548	544	543	547	542,5	544	540	540	545

наполнителя (состав: ТРГ/ЭС_{С0} = 8/8) по комплексу теплофизических и механических характеристик дает основание сделать следующие выводы: износ и температура в зоне контакта изменяются симбатно, а коэффициент трения антибатно росту давления и скорости скольжения; при одинаковых значениях PV температура в зоне контакта ниже в случае большей скорости, т.е. когда время фрикционного контакта меньше.

Триботехнические исследования композита позволили установить, что при одинаковых значениях PV

температура в зоне контакта ниже при более высокой скорости, т.е. когда время фрикционного контакта меньше (табл. 6). Поверхность образцов композитов в исследованном интервале нагрузок стекловидная, что характерно для усталостного механизма изнашивания.

Сравнение результатов изнашивания КМ при смазке водой и маслом (табл. 7) позволяет отдать предпочтение маслу. Картина изнашивания КМ аналогична наблюдаемой при армировании фенилона органическими волокнами: арамид-Т [12], сульфон-Т [13], и вниивлон [14].

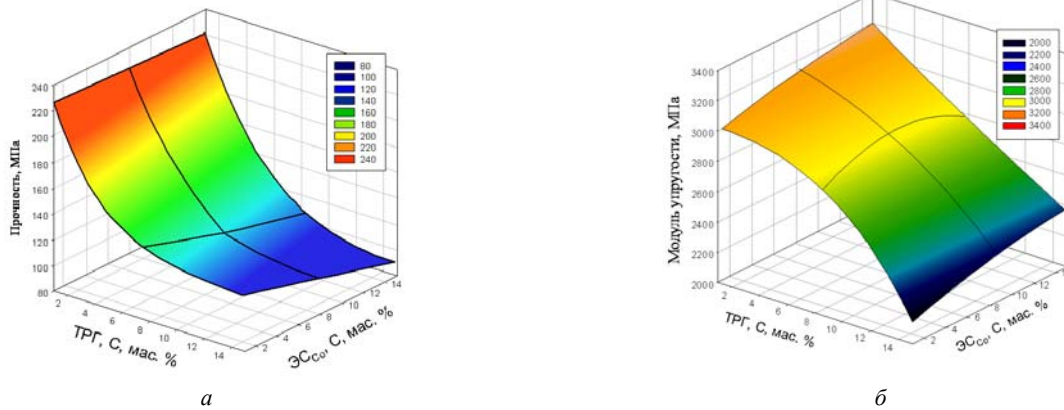


Рис. 2. Зависимость прочности (а) и модуля упругости (б) при сжатии от состава композита на основе фенилона, модифицированного ТРГ и ЭС_{С0}

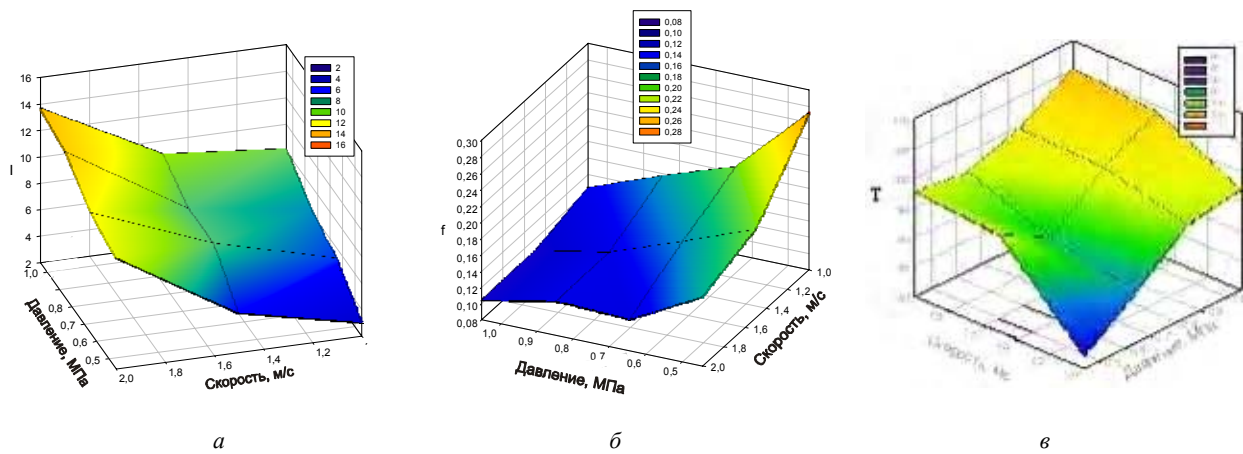


Рис. 3. Зависимость интенсивности линейного износа (а), коэффициента трения (б) и температуры в зоне контакта (в) от скорости скольжения и давления (сталь 45, HRC 52, R_a = 0,17) для композита на основе фенилона с гибридным наполнителем (ТРГ/ЭС_{С0} = 8/8)

Таблица 6 – Зависимость температуры в зоне контакта от режимов эксплуатации

Показатели	PV = 1,6 МПа·м/с	
Скорость скольжения, V (м/с)	2	1,6
Давление, P (МПа)	0,8	10
Температура в зоне контакта, T (К)	372,5	377

Таблица 7 – Износ материала на основе фенилона

Материал	Износ в условиях трения при смазке, мг					
	водой			маслом		
	при нагрузке, МПа					
	2,5	5,0	$I_{5,0}/I_{2,5}$	2,5	5,0	$I_{5,0}/I_{2,5}$
Фенилон	37,5	348,75	9,3	0,35	0,77	2,2
Композит*	1,56	8,6	5,5	0,125	0,275	2,2

Примечание: * – фенилон, модифицированный гибридным наполнителем (8 масс. % ТРГ и 8 масс. % состава ЭС_{Co}).

Таким образом, разработанный материал можно рекомендовать для эксплуатации при значениях фактора PV в режимах: сухого трения – 1,6; при смазке водой – 2,5 и маслом 5,0 МПа·м/с.

Выводы

Полученные результаты показали, что совместное использование наполнителей приводит к их взаимному активированию и синергическому эффекту, позволяющему широко варьировать теплофизические, физико-механические и триботехнические свойства материала.

Перечень ссылок

1. Сытар В. И. Конструкционные материалы на основе графитонаполненного фенилона / Сытар В. И., Буря А. И. // Придніпровський науковий вісник. – 1998. – № 78. – С. 5–31.
2. Burya A. I. Properties and industrial application of hybride composites based on polyamide / Burya A.I.// Prace naukowe Katedry Budowy Maszyn, Seria : Konferencje «Polymery I Kompozyty Konstrukcyjne», 6–9.10.98. – Vol. 2. – P. 51–54.
3. Буря А. И. Новые полимерные композиты в узлах трения железнодорожного транспорта / Буря А. И., Дудин В. Ю., Чукаловский П. А. // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. Техн. науки. Серія : Транспорт. – 2004. – № 8. – С. 184–189.
4. Буря А. И. Свойства графитопластов на основе полиамида фенилон, наполненного термически расщепленным графитом / Буря А. И., Дудин В. Ю., Буря А. А. // Тезисы докл. II Украинско-Польской научн. конф. «Полимеры специального назначения», 27–31 мая 2002, Днепрпетровск. – С. 74–75.
5. Кудина Э. Ф. Дисперсные органо-неорганические нанокompозиты, получаемые из растворов силиката натрия: синтез, свойства, применение / Кудина Э. Ф., Плещачевский Ю. М., Буря А. И. // Композитные материалы. – Т. 1. – № 1. – 2007. – С. 8–19.
6. Курневич Г. И. Особенности формирования уплотнительного материала из термически расщепленного графита / Курневич Г. И., Юриков В. С., Вечер А. А. // Неорганические материалы. – 1995. –Т. 31. – С. 457–461.
7. Кудина Е. Ф. Получение эпоксимиеральных дисперсных композитов / Кудина Е. Ф. // Материалы 26-й междунар. конф. «Композиционные материалы в промышленности» (Славполик). Ялта, Крым, 2006. – С. 315–318.
8. E. F. Kudina. Modification of Alkali Silicate Solutions by Organic Reagents and Investigation of the Properties of the Final Products / E. F. Kudina., Yu. M. Pleskachevskii // Glass Physics and Chemistry. – 2009. – Vol. 35, No. 4. – P. 436–442.
9. Кудина Е. Ф. Разработка высокодисперсных органо-кремнеземных нанокompозитов / Кудина Е. Ф., Плещачевский Ю. М., Буря А. И. // Материалы, технологии, инструменты. – 2008. – Т. 13, № 1. – С. 40–44.
10. Справочник по пластическим массам. Т. 2 / Под ред. В. М. Катаева, В. А. Попова, Б. И. Сажина. – М.: «Химия», 1975. – 568 с.
11. Кудина Е. Ф. Влияние эпоксисиликата кобальта и терморасширенного графита на теплофизические свойства фенилона / [Кудина Е. Ф., Буря А. И., Плещачевский Ю. М. и др.] // Вопросы химии и химической технологии. – 2008. – № 6. – С. 66–71.
12. Буря А. И. Повышение износостойкости фенилона, армированного волокном / Буря А. И. // Технология и организация производства : сб. науч. ст. – К.: УкрНИИИТИ, 1976. – № 11. – С. 60–61.
13. Буря А. И. Исследование композиционных материалов, армированных волокном сульфон-Т / Буря А. И., Мовчан В. О., Щетинин А. М. // Технология и организация производства : сб. науч. ст. – К.: УкрНИИИТИ, 1980. – № 1. – С. 52–54.
14. Буря А. И. Органопластики на основе волокон из ароматических полиамидов / Буря А. И., Токарев А. В. // Композиционные полимерные материалы. – 1982. – Вып. 13. – С. 43–46.

Одержано 8.12.2009

A. I. Burya, E. F. Kudina, N. S. Gayun

INFLUENCE OF NATURE AND COMPOUND CONTENT ON PROPERTES OF COMPOSITE BASED ON PHENYLONUM

Досліджено фізико-механічні та трибологічні властивості матеріалів, отриманих на основі термопласту фенілон С-2, модифікованого терморозширеним графітом та синтезованим епоксісилікатом кобальту. Встановлено оптимальний склад композиту й режими експлуатації. Показано, що одночасне використання наповнювачів приведе, до їх взаємної активації та синергетичного ефекту, який дозволяє широко варіювати експлуатаційні властивості матеріалу.

Ключові слова: наповнювач, тертя, зношування, міцність.

Physico-mechanical and tribotechnical properties of materials obtained on the basis of phenilon C-2 thermoplastic modified with thermally expanded graphite and synthesized by cobalt epoxy-silicate have been investigated. The optimum composite content and maintenance modes have been stated. The combined application of compounds result in their mutual activation and synergetic effect allowing to vary widely the operational properties of the material was shown.

Key words: compound, friction, wear, durability.

УДК 621.771.23.09.

Канд. техн. наук А. Б. Максимов

Государственный морской технологический университет, г. Керчь

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ РАСТЯЖЕНИИ-СЖАТИИ

Представлены данные об изменении пластических характеристик стали при деформировании образцов в одном направлении и циклическом по жесткой схеме нагружения.

Ключевые слова: деформация, растяжение, сжатие, цикличность, объём, пластичность, коэффициент поперечной деформации.

Материал и методика исследования

Для исследования использовали плоские образцы рабочей частью $3 \times 3 \times 3$ мм с захватами из толстолистовой стали марок 10ХСНД и 17Г1С-у в отожженном, нормализованном и термоупрочненном состояниях. Испытание на одноосное растяжение, сжатие и циклическое растяжение-сжатие проводили на усовершенствованной установке ИМАШ-5с-65 [1] при комнатной температуре. Циклическое деформирование проводили по жесткой схеме нагружения по симметричному циклу с амплитудой деформации 2 и 5 %. Для исследования течения металла на рабочей части образца наносили отпечатки с помощью микротвердомера ПМТ-3м через равные промежутки в продольном и поперечном направлениях. Продольную и поперечную деформацию определяли по изменению расстояний между отпечатками в соответствующих направлениях. Коэффициент поперечной деформации рассчитывали по формуле: $\nu = \varepsilon_{\perp} / \varepsilon_{\parallel}$ и брали по абсолютной величине, где ε_{\perp} и ε_{\parallel} – соответственно поперечная и продольная деформации.

Теория и анализ полученных результатов

При одноосном растяжении в интервале 2-3 % величина поперечной деформации возрастает более интенсивно, причем коэффициент поперечной деформации составляет 0,62 и 0,70 соответственно для сталей

17Г1С-у и 10ХСНД (рис. 1). С увеличением продольной деформации интенсивность возрастания поперечной деформации уменьшается, при этом коэффициент поперечной деформации составляет 0,36–0,38 (что довольно близко к значению коэффициента Пуассона в упругой области – 0,28–0,30). Характерно, что зависимость между продольной и поперечной деформациями на обоих участках носит прямопропорциональный характер.

На рис. 2 представлены зависимости относительного изменения объема при растяжении и сжатии. На первых этапах деформирования при растяжении для нормализованного и термоупрочненного состояний происходит уменьшение объема, а затем для сталей во всех структурных состояниях происходит увеличение объема. При сжатии изменение относительно объема противоположно. Такой характер изменения относительного объема находится в соответствии с результатами работы [2]. В теории упругости относительное изменение объема определяется по формуле [3]:

$$\frac{\Delta V}{V} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3, \quad (1)$$

где ε_1 – продольная деформация,
 $\varepsilon_2, \varepsilon_3$ – поперечные деформации в двух взаимноперпендикулярных направлениях.